

デジタル制御による周波数シンセサイザの高性能化・高機能化に関する研究

著者	田島 賢一
号	56
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4595号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61551

氏名	たじま けんいち 田 島 賢 一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成24年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	ディジタル制御による周波数シンセサイザの高性能化・高機能化に関する研究
指導教員	東北大学教授 末松 憲治
論文審査委員	主査 東北大学教授 末松 憲治 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 安達 文幸 東北大学客員教授 高木 直

論文内容要旨

本論文では、ユビキタスネットワーク社会の実現に向け、無線通信装置の局部発振源に用いる周波数シンセサイザの性能向上と機能追加を目的として、ディジタル演算で信号を生成する直接ディジタルシンセサイザ(DDS)の高周波化・広帯域化・低スプリアス化と、可変分周数をディジタル制御するフラクショナル-N PLL(F-PLL)シンセサイザでの位相制御機能の付加について実施した研究成果をまとめたものである。

第1章は序論であり、本研究の背景、位置づけ、および研究目的について述べている。あらゆる電子機器がインターネットに接続され、いつでも、どのような場所でもインターネット上のサービスを利用することのできる環境としてのユビキタスネットワーク社会の実現に向けて、無線通信システムには、高速な伝送速度と安定な接続環境が要望されている。また無線通信システムを用いて災害発生時など緊急時の通信網を構築することも今後必要であると考えられ、そのためには伝送速度は低速でも良いが、常時接続を目標とする高安定な接続環境が重要となる。このような要望に対して課題となるのが、無線通信システムが利用できる周波数帯域が十分確保できていないことである。そこで対策として周波数の利用効率向上があり、無線通信装置のなかで、搬送波周波数を生成する局部発振源に用いる周波数シンセサイザの高性能化・高機能化が必須となる。本研究の目的は、周波数シンセサイザの高性能化および高機能化に関する課題をディジタル制御により解決することである。まず高性能化については、ディジタル演算により信号を直接生成し、高速な周波数切替と高い周波数分解能な DDS をベースとしたマイクロ波帯信号源を実現する。そのために DDS の高周波化に伴い新たに発生する課題(広帯域化, 低スプリアス化)を解決する。高機能化については、基準信号源を共通化した

F-PLL シンセサイザの出力信号間のデジタル位相制御を実現する。周波数シンセサイザの高性能化により、周波数利用効率を向上する周波数共用型コグニティブ無線技術の実用化に大きく寄与する。また周波数シンセサイザにデジタル位相制御機能を加えることで、Phased Array Antenna(PAA)によるビームフォーミング技術の性能向上を図り、同一通信エリア内で収容できるユーザ数の増加を図る。

第2章では、位相ホールディング(PH)型 DA 変換器を用いた DDS(PH-DDS)のイメージ抑圧による広帯域化技術について述べている。DDS を高周波化する手段として、一般に良く用いられているゼロ次ホールド特性の DA 変換器から PH 型 DA 変換器に変更する手段がある。PH 型 DA 変換器は、DDS クロックの半周期の時間、振幅値をホールドし、そして符号を反転する動作となる。このような動作である PH 型 DA 変換器を用いることで、従来ではイメージであった周波数成分を所望波として利用でき、DDS のデジタル演算速度を高めることなく高周波化を実現できる。ただし、所望波に対して両側波帯にはサンプリング処理で発生する高レベルなイメージが存在するため、これらイメージを抑圧するためにフィルタを用いると、DDS で可変できる周波数範囲が制約される。そこで提案方式では、フィルタレスのイメージ抑圧による広帯域化を目的としている。提案方式では、出力パルス数が2と3である2PH型と3PH型のDA変換器を用いたDDSのイメージの位相関係に着目し、これらDDSの加算処理によりイメージの逆相合成を実現している。さらに任意の出力周波数において逆相合成の振幅条件を満足するために、3PH型のPH型DA変換器の振幅係数を、導出した設計式に基づき調整している。VHF 帯での原理検証実験の結果、イメージレベルは-51.4~-33.5 dBc であり、従来の PH-DDS と比較して 25~50 dB のイメージ抑圧効果を確認している。

第3章では、DDS を高周波化する一手段である、出力位相が直交する2つのDDSを直交ミキサのIF信号源とするDDS駆動イメージ抑圧型デジタル信号源の広帯域化技術について述べている。このデジタル信号源では、直交ミキサとその局部発振源であるPLLシンセサイザにより、DDSの出力周波数をマイクロ波帯に周波数変換する。また本デジタル信号源は、イメージ抑圧ミキサ構成となるため、デジタル信号源の出力に存在するミキサのイメージが抑圧されるため、デジタル信号源出力に設けるRF帯フィルタが不要となる、ないしは簡素化できる。ただし、デジタル信号源の出力周波数の範囲は、直交ミキサの局部発振周波数に対して上または下側波帯のいずれかとなり、高速に周波数できる可変範囲はDDSの出力周波数範囲と等しくなる。提案方式では、両側波帯の切換によるデジタル信号源の広帯域化を目的としている。提案方式では、DDSの周波数設定データに対するDDS出力信号の位相変化(正または負の傾き)について着目し、従来使用されていなかった周波数設定データの範囲を用いることで、DDSと直交ミキサの

ハードウェアの改修を必要とせず側波帯の切換を実現している。さらに提案方式は、周波数切換時の位相連続性を保証していることを、デジタル信号源の出力信号の計算式より明らかとしている。L 帯デジタル信号源の試作結果により、直交ミキサの局部発振周波数を中心に両側波帯での利用により、従来方式と比較して 2 倍の広帯域化を実現し、提案手法の有効性を確認している。

第 4 章では、DDS を高周波化する一つ的手段である、分周制御付き DDS 駆動 PLL シンセサイザの低スプリアス化技術について述べている。PLL の基準信号源に DDS を用いる DDS 駆動 PLL シンセサイザでは、PLL シンセサイザを可変 N 通倍器として扱うことができるので、DDS の高周波化および広帯域化が可能となる。ただし、従来の DDS 駆動 PLL シンセサイザで広帯域に周波数を可変した際に、特定の出力周波数では、所望波近傍に DDS の量子化誤差や DA 変換器の非線形性に起因するスプリアスが存在し、さらにこのスプリアスは PLL シンセサイザで劣化するため、無線通信システムの規格を満足しないことがある。そこで提案方式では、スプリアス低減による広帯域化を目的としている。提案方式では、DDS の出力周波数に応じてスプリアスの周波数が変化し、結果、所望波近傍となるスプリアスレベルも変化することに着目し、DDS が低スプリアスとなる周波数条件を利用することで、DDS のハードウェアの改修を必要とせず、広帯域にわたって低スプリアス化を実現している。任意の出力周波数に対して低スプリアスとなる周波数条件を利用するために、DDS 駆動 PLL シンセサイザの周波数設定パラメータの数を従来の 2 から 3 に増やしている。提案方式では、PLL の基準信号源として、DDS 出力に R 分周器を新たに配置した分周制御付き DDS を適用している。あわせて DDS のスプリアスを考慮した周波数設定アルゴリズムを用いて、周波数設定パラメータを効率良く求めている。5~10GHz 帯シンセサイザの試作結果により、-46 dBc 以下の低スプリアス特性を実現しており、R 分周器の制御を行わない場合と比較して 13 dB のスプリアスレベルの改善効果があることを確認している。

第 5 章では、周波数シンセサイザの高機能化に関連して、基準信号を共通化した位相制御付き F-PLL シンセサイザの出力信号間の位相制御方式について述べている。まず高周波帯信号の位相制御手法として、IF 帯変調信号を RF 帯の周波数変換する際にあわせて位相制御を行う。そのために、ミキサの局部発振信号源である周波数シンセサイザにデジタル位相制御機能を付加する。このようなデジタル位相制御を実現することで、RF 帯移相器による位相制御方式よりも高精度・高分解能かつ低損失な特性が得られる。提案方式では、高周波・広帯域な特長を有する PLL シンセサイザにデジタル位相制御を付加することを目的としている。PLL シンセサイザでは、基準信号と同期信号の位相差が一定となるように、出力信号の位相を収束制御する。すなわち、同期信号にデジタル的に位相情報を付加することで、

出力信号のデジタル位相制御を実現できる。提案方式では、PLL シンセサイザの同期信号を生成する可変分周器の分周数を時間的にデジタル制御する F-PLL シンセサイザにおいて、同期信号の周期が基準信号と異なることに着目し、そして周波数と位相の設定値に応じた分周データのシーケンス生成と分周データのシーケンスの開始タイミングシフトによる位相制御手法を実現している。L 帯 F-PLL シンセサイザの試作結果により、所望の周波数ステップ 11.25 度(誤差 ± 2 度以内)で位相制御を実現し、提案手法の有効性を確認している。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果について述べるとともに、本研究を踏まえた周波数シンセサイザの高性能化の流れと、複数のアンテナを用いる PAA 方式について今後の展望を述べている。今後の無線通信システムには、様々な周波数帯、変調方式および伝送速度の通信システムを一つの端末でシームレスに使用できる、本格的なマルチモード/マルチバンド通信への対応が期待されている。このような通信の実現には、様々な通信システムの周波数帯や通信規格を満足するとともに、今後現れる新たな通信システムに対応するための広帯域動作や、通信システム間をシームレスに切り換えるための高速な周波数切換動作が要求される。また周波数の利用効率の向上の一環として、ビームフォーミング技術と同様に、複数のアンテナを用いて通信を行う MIMO 技術があり、異なる周波数を利用することで高速な伝送速度の実現が期待されている。そこで本研究では、DDS をベースとしたマイクロ波帯信号源の実現について述べた。ただし、DDS 級の高速な周波数速度と高い周波数分解能および PLL 級の高周波特性と広帯域幅を両立するためには、周波数シンセサイザの更なる高性能化の研究が必要となる。今後、半導体プロセスの微細化に伴い、DDS の高周波化と広帯域化が期待できる。一方、PLL のデジタル化による高性能化が考えられ、その一つとして All-Digital Phase Locked Loop(ADPLL)シンセサイザがある。このような DDS 単体の高性能化と ADPLL シンセサイザに代表されるデジタル PLL シンセサイザの併用により、周波数シンセサイザの更なる高性能化が期待される。複数のアンテナを用いる PAA 方式については、微細 CMOS 技術の進展に伴い、アナログ/デジタル回路の混載による各アンテナ放射素子回路の自律制御が可能となり、例えば異なる複数の動作モードを同時に実行できるようになる。またデジタルアシスト機能によるアナログ回路の性能補償が行われる。以上のとおり、デジタル制御によるシンセサイザを含めたアナログ回路の高性能化・高機能化に関する研究開発がますます盛んになるものと考えられる。

論文審査結果の要旨

シームレスでより利便性の高いマルチモード・マルチバンド無線通信システムにおいては、高速な伝送速度や高安定な接続性が要求されるので、それぞれのシステムで利用できる周波数の不足が課題となりつつある。周波数の利用効率を向上させるためには、無線通信装置の中で搬送波周波数を生成する周波数シンセサイザの高性能化・高機能化が重要である。本論文は、デジタル制御による周波数シンセサイザの高性能化・高機能化を可能とする方式・構成の提案及び実証結果をまとめたものであり、全編 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、デジタル演算で信号を生成する直接デジタルシンセサイザ (DDS) の高周波化の一手段である位相ホールディング (PH) 型デジタル・アナログ (D/A) 変換器の適用に際して課題となるイメージの抑圧方式を提案し、その有効性を明らかにしている。本提案方式では、2PH 型と 3PH 型の D/A 変換器を用いた場合のイメージの位相関係に着目し、逆相合成構成によりイメージを抑圧する。VHF 帯での原理検証実験を通じて、広い周波数範囲にわたって抑圧効果を実証している。これは、DDS の高周波化・広帯域化技術として、極めて重要な成果である。

第 3 章では、位相同期ループ (PLL) との併用による DDS の高周波化技術の一つである、DDS 駆動イメージ抑圧型デジタル信号源の広帯域化技術を提案している。本信号源をイメージ抑圧ミキサの構成とすることで、PLL の出力周波数を中心に、DDS で高速な周波数切換を実現している。従来使用されていなかった DDS の設定範囲に着目することで、DDS の周波数制御により高速に可変できる帯域幅を従来の 2 倍に拡大している。L 帯での試作を通して高周波帯での有用性を示しており、高速な周波数ホッピングを実現する技術として、極めて高く評価される。

第 4 章では、DDS と高周波化技術の一つである分周制御付き DDS 駆動 PLL シンセサイザの広帯域化に際し課題となるスプリアスの抑圧方式を提案している。提案方式では、DDS の出力周波数に応じて所望波近傍に生じるスプリアスのレベルが変化することに着目し、DDS を低スプリアスとなる条件で使用するために、出力周波数を与える周波数設定パラメータを従来の 2 個から 3 個に増やしている。5~10 GHz 帯での試作を通して低スプリアス化を実証し、提案方式の有用性を示している。周波数シンセサイザの高性能化に対し、この成果は高く評価される。

第 5 章では、可変分周数をデジタル制御するフラクショナル-N PLL シンセサイザでの位相制御機能について述べている。本シンセサイザにおいて基準信号と同期信号との位相差に着目し、同期信号を生成する分周データに位相情報を付加することで、基準信号を共通化した フラクショナル-N PLL シンセサイザの出力信号間の位相制御を提案しており、L 帯での試作を通して位相制御機能を実証している。提案する分周データによる位相制御の付加方式は世界初の試みであり、周波数シンセサイザの高機能化に対し、これは極めて有用な成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、周波数シンセサイザの高性能化・高機能化をデジタル制御で実現する方式・構成を提案し、その有用性を示したものであり、電気・通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。